تثبیت بستر اطراف تکیه‌گاه با ترکیب المان‌های شش‌پایه و سنگ‌ریزه*

مقاله پژوهشی

مسیح ذوالقدر[۱] علی اکبر حسین رضا[۲] محمود شفاعی بجستان[۳]

چکیده *امروزه برای حفاظت تکیه‌گاه پل های موجود در مقابل آب‌شستگی از لاشه سنگ بطور گسترده استفاده می شود. یکی از مصالح پوششی که می‌تواند جایگزین لاشه سنگ شود المان‌های بتنی است. در این تحقیق تاثیر سنگ‌ریزه، المان‌های بتنی شش‌پایه و ترکیب آنها بر مهار آب‌شستگی تکیه‌گاه در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. کارگذاری المان‌های شش‌پایه در تراکم‌های کم و زیاد (باز و متراکم) و همچنین در اعماق زیر بستر، روی بستر و حالت میانی در اطراف تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل انجام گرفته است. به طورکلی نتایج نشان می‌دهد که کارگذاری سنگ‌ریزه و المان شش‌پایه می‌تواند آب‌شستگی پیرامون تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل را به طور کامل حذف کرده و آب‌شستگی پیرامون تکیه گاه با دیواره قائم را تا ۷۰ در صد کاهش دهد. در کارگذاری المان‌های بتنی، شکست لبه‌ای در آرایشی که بیشترین مهار آبشستگی حاصل گردیده مشاهده شد. همچنین ترکیب کارگذاری المان‌های بتنی و سنگ‌ریزه نیز بررسی شد که ملاحظه گردید که علاوه بر مهار آبشستگی دماغه تکیه‌گاه، شکست لبه‌ای نیز رخ نداد.*

واژه‌های کلیدی المان بتنی شش‌پایه، ، آبشستگی، دیواره قائم، دیواره بالی شکل، شکست لبه‌ای.

Bed Stabilization around Abutment Using Combination of Six-Legged Concrete Elements and Pebbles

M. Zolghadr A. Hoseinreza M. Shafai Bajestan

Abstract *Installation of stone particles is a very common method to protect abutment against scour. An alternative is concrete elements. In this research, installation of pebbles, Six-Legged Concrete (SLC) elements and combination of them is studied in laboratory. SLC elements were installed in open and dense arrangements with three different depths; on the bed, under the bed and the median case around wing-wall and vertical-wall abutment. Generally, results showed the significant effect of scour mitigation when both methods were applied so that, the maximum scour depth at the abutment toed was reduced up to 70% in vertical wall abutment and totally eliminated at the wing wall abutment. Edge failure was observed when the best scour reduction was achieved in SLC elements installation case. However, best countermeasure was achieved when both methods were applied while edge failure was also controlled. Transformation of the maximum scour depth from the abutment toe to the channel midway at the downstream of the abutment is also discussed.*

Key Word Six-legged concrete elements, Vertical-wall, Wing-wall, Edge failure.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۸/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱۱/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه جهرم، جهرم.

Email: zolghadr.masih@jahromu.ac.ir

(۲) دانش آموخته دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

(۳) استاد، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

مقدمه

همه ساله پل‌های زیادی در سراسر دنیا عموما به دلایل هیدرولیکی تخریب می‌گردند. در سیلاب بهمن ماه ۱۳۹۵ در استان فارس دو پل در محور اصلی شیراز- جهرم تقریبا به طور همزمان تخریب گردیدند. در سیلاب‌های فروردین ماه ۹۸ نیز چندین پل و راه ارتباطی تخریب گردیدند که از آن جمله می‌توان به پل جدید کشکان در محور خرم آباد-کوهدشت و پل فلزی بخش ماژین دره شهرستان ایلام اشاره کرد. مطالعات Melville (1992) موید این مطلب است که ۷۰ درصد هزینه‌های مالی شکست پل، ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه و تخریب آن بوده است [1]. بنابراین، مقاوم سازی پل‌ها در برابر آبشستگی امری ضروری است. به طور کلی، جهت حفاظت پی پل دو روش اصلاح الگوی جریان و پوششی در ادبیات فنی مطرح می‌باشد.

در روش اصلاح الگوی جریان، عوامل اصلی ایجاد آبشستگی شامل جریان رو به پایین و گرداب اصلی، تضعیف شده یا از محل دور می‌گردند. نصب طوقه، صفحات مستغرق، دیوارهای موازی و المان‌های زبری جزو این دسته هستند که توسط پژوهشگران مختلفی مورد واکاوی قرار گرفته‌اند [2,3,4].

در روش پوششی، قطعات سنگینی که توسط جریان آب جابجا نمی‌گردند، پیرامون پی کارگذاری می‌گردند. به کارگیری سنگ‌ریزه، توریسنگ، قطعات بتنی، ژئوبگ و غیره مثال‌هایی از این دسته هستند [5,6]. نتایج این مطالعات عموما تعیین اندازه المان‌ها، گستره پوشش و به طور کلی هندسه آن می‌باشد. مرور انواع روش های مهار آبشستگی در قالب دو دسته فوق و در مجاورت پایه پل توسط مرجع [6] صورت گرفته است. در نواحی که تهیه سنگ با ابعاد مورد نظر دشوار و پرهزینه باشد (مثل مناطق ساحلی، شهری، دشت، جلگه و غیره) می‌توان به عنوان جایگزین، از قطعات بتنی استفاده کرد. یکی از المان‌های بتنی که در مهندسی دریا، حفاظت سواحل و موج شکن‌ها مورد استفاده می‌باشد، المان‌های بتنی شش‌پایه با نام تجاری a-jacks هستند.

این المان‌ها به عنوان ابزار مهار فرسایش پنجه ساحل رودخانه‌ها نیز توصیه شده‌اند [7]. کارگذاری این المان‌ها در بستر رودخانه منجر به استهلاک انرژی جنبشی و افزایش مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی می‌شود. این المان‌ها از طرفین با المان‌های کناری قفل شده و بصورت یکپارچه عمل می‌کنند و ضمن ایجاد پوشش و افزایش زبری، امکان ایجاد پوشش گیاهی در میان پایه‌ها را فراهم نموده و به حفظ طبیعی ساحل رودخانه کمک می‌کنند. در مورد المان‌های بتنی شش‌پایه مطالعات انگشت شماری انجام شده که عموما از دیدگاه سازه‌ای بوده است. مطالعات هیدرولیکی عموما مرتبط با کاربرد آن‌ها در موج شکن و تا حدودی به حفاظت کناره رودخانه‌ها و پایه پل می‌باشد. کروالیس آزمایش‌هایی در مورد این المان‌ها به عنوان موج شکن مستغرق و به منظور تعیین ضرایب انتقال موج انجام داد [8]. پایداری المان-های مستقر بر روی موج شکن از جنس سنگ، در برابر انواع موج توسط [9] مورد آزمایش و واکاوی قرار گرفت. نیروی‌های وارده از طرف موج بر این المان‌ها به صورت آزمایشگاهی و عددی شبیه سازی شدند [10] ضرایب افت و خیز و انعکاس موج برای این المان‌ها با شبیه سازی آزمایشگاهی در مطالعه‌ای دیگر تعیین گردید [11]. یک مطالعه سازه‌ای نیز بر روی قطعات شش‌پایه جهت بررسی رفتار آن‌ها تحت بارهای استاتیکی قائم انجام پذیرفت [12]. در سال بعد مطالعه‌ای جهت بررسی تنش-های دینامیکی و استاتیکی درون قطعات بتنی المان‌های شش‌پایه در همان دانشگاه انجام شد [13]. مطالعات اندکی در ارتباط با کارکرد این المان‌ها را در کنترل آبشستگی منتشر شده است. در این زمینه می‌توان به نتایج آزمایش‌هایی که به وسیله [14,15] برای بررسی آبشستگی پایه پل در بسترماسه‌ای انجام شد اشاره کرد. نتایج نشان داد که میزان کاهش عمق آبشستگی با نصب المان‌های شش‌پایه ۷۰ تا ۹۵ درصد می‌باشد. آن‌ها پیشنهاد

نمودند که این المان‌ها باید به همراه فیلتر ژئوتکستایل و یا قرارگیری قطعات سنگ بین آن‌ها استفاده شود. در سال های ۱۳۹۵، ۱۳۹۷, ۱۳۹۹ [18-۱٦] به بررسی تاثیر کارگذاری این المان‌ها پیرامون تکیه‌گاه پل بدون در نظر گرفتن سنگ‌ریزه پرداختند. در این مطالعات المان‌های شش‌پایه مستقیما بر روی بستر ماسه‌ای قرار گرفته و شکست برشی لایه محافظتی در طی آزمایش‌ها ملاحظه گردید. در مطالعه دیگری تاثیر رقوم متفاوت کارگذاری سنگ ریزه و المان های بتنی نسبت به یکدیگر پیرامون تکیه گاه مستطیلی تحت یک تراکم کارگذاری بررسی شد. این پژوهشگران بیشتر درصد کاهش آبشستگی را معادل ۸۹ درصد اعلام نمودند [۱۹].

در ارتباط با مهار آبشستگی توسط سنگ‌ریزه نیز اخیرا مطالعات متعددی صورت گرفته است. از آن جمله خادم قانعی و همکاران، در طی یک مطالعه آزمایشگاهی ابعاد مختلف سنگ‌ریزه را که منجر به درصدهای مختلف حفاظت از پایه پل می‌گردید ارائه دادند. آن ها نتیجه گرفتند استفاده از ابعاد کوچکتر سنگ منجر به فرسایش یافتن المان‌های سنگی می‌گردد اما نهایتا قطعات باقی مانده به درون حفره آبشستگی غلتیده و پیشرفت آبشستگی را متوقف می‌کنند [20]. یکی از مشکلات استفاده از سنگ‌چین به خطر افتادن پایداری آن می‌باشد که ناشی از عدم امکان قفل شدن قطعات سنگی به یکدیگر است. یکی از روش‌های رفع این مشکل تزریق در پوشش سنگ‌چین می‌باشد. راهنمای طراحی پوشش سنگ‌چین تزریق شده در شرایط تر و خشک در طی مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که اثرات جانبی زیست محیطی این پوشش در حالت خشک ناچیز می باشد [21].

با توجه به وجود موارد عدم قطعیت متنوع در برآورد پارامترهای موثر بر تعیین اندازه سنگ پایدار جهت حفاظت از پایه پل در برابر آبشستگی، تحلیل حساسیت و بررسی پایداری پوشش سنگ‌چین پیرامون پایه، بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان طی مطالعه‌ای صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که عدم قطعیت‌های موجود در پارامتر هایی مثل عمق و سرعت جریان منجر به کاهش قابل توجه قابلیت اطمینان لایه محافظ سنگچین می‌گردد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مهم ترین پارامتر در تعیین قابلیت اطمینان لایه سنگچین، سرعت متوسط جریان می باشد [۲۲].

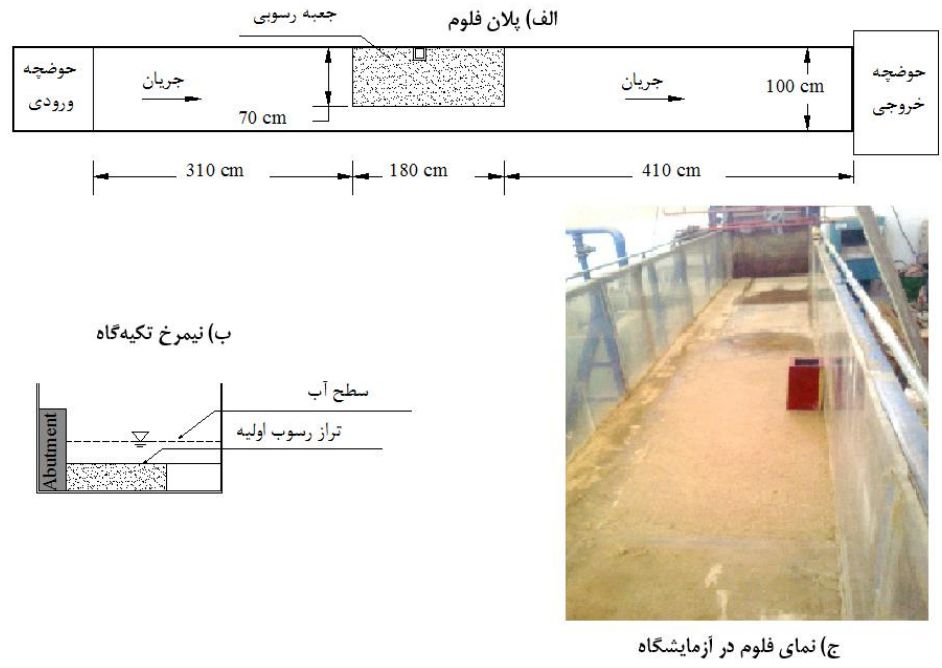
با توجه به مزایای المان‌های شش‌پایه از یک سو و استفاده متداول و گسترده از سنگ‌ریزه از سوی دیگر مطالعه کاربرد ترکیبی این دو روش حفاظتی در این پژوهش صورت گرفته است. در این مطالعه تراکم قرارگیری المان‌ها و نیز عمق کارگذاری این المان‌ها به صورت منفرد و در ترکیب با سنگ‌ریزه مورد بررسی آزمایشگاهی و مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی از پوشش پلاکسی گلس به طول، عرض و عمق به ترتیب ۱۰، ۱ و ۰/٦ متر و شیب طولی ناچیز طراحی شد. در اواسط فلوم یک جعبه رسوبی به عرض، طول و عمق به ترتیب ۷۰ و ۱۸۰ و ۳۰ سانتی متر قرار داشته است. داخل جعبه رسوبی، رسوبات غیرچسبنده، شامل ماسه یکنواخت با اندازه متوسط (D_{50}) ۰/٦۵ میلی متر و با انحراف معیار هندسی 1/28 و ضریب یکنواختی ۲,۰۲ قرار گرفته است. اندازه ذره رسوبی کمتر از ۱میلی متر در نظر گرفته شده است. انتخاب این اندازه به این دلیل بوده که سرعت آستانه حرکت رسوبات و همچنین زمان رسیدن به تعادل حفره آبشستگی با کاهش قطر ذرات کاهش پیدا می‌نماید. از طرفی انتخاب این اندازه باعث جلوگیری از تشکیل فرم‌های بستر می‌گردد [۲۳]. هرچند جهت اطمینان عدم تشکیل فرم بستر، آزمایش‌های اولیه‌ای در شرایط هیدرولیکی تحت مطالعه، بر روی رسوبات انجام گردید. در انتهای فلوم سریز لبه

تیز مستطیلی به منظور تنظیم سطح آب قرار داشته است. در بدو ورود آب به مخزن، سرریزی مثلثی جهت اندازه گیری بده جریان نصب شده است. در شکل (۱) فلوم آزمایشگاهی و مشخصات آن نمایش داده شده است.

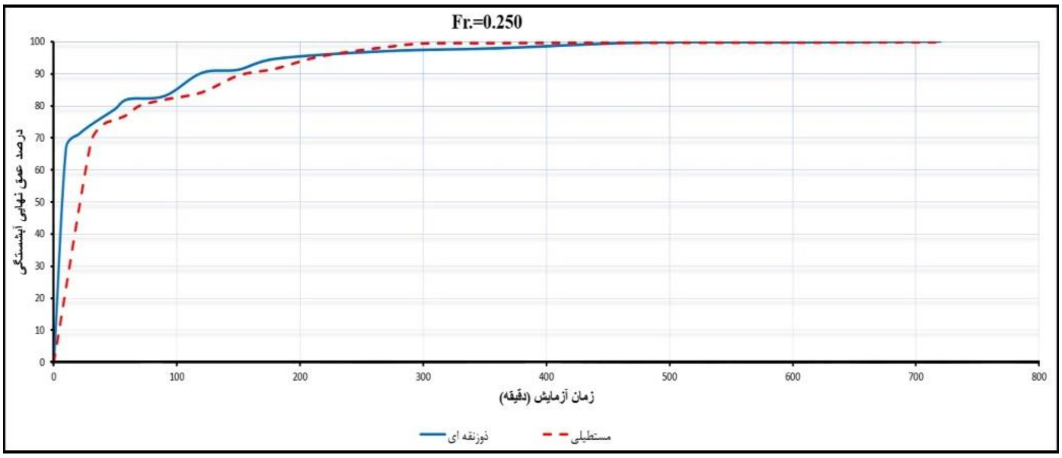
عمق جریان در کلیه آزمایش‌ها ثابت و معادل ۰/۱۲ متر بوده است. مطابق معیار ارائه شده در منبع [۲٤] در اعماق بیش از شش سانتی متر تاثیرات کشش سطحی آب حذف می‌گردد. همچنین ابعاد مشابه این فلوم در مطالعات دیگری که در ارتباط با آبشستگی تکیه‌گاه بوده‌اند مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷–۲۵]. با افزایش سرعت جریان، چهار عدد فرود متفاوت بررسی گردیدند. دو شکل مختلف تکیه‌گاه با فاصله ۰/۷۱ متر از ابتدای جعبه رسوبی نصب گردید. یکی از تکیه‌گاه‌ها با دیواره بالی شکل و با زاویه اضلاع ٤٥ درجه، با قاعده بزرگ و کوچک به ترتیب ۰/٤٥ و ۰/۱۵ متر بوده است. تکیه‌گاه دیگر از نوع با دیواره قائم و اضلاع ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به طبقه بندی ملویل، این تکیه‌گاه‌ها، از نوع متوسط قرار می‌گیرد که عمق آبشستگی آن‌ها تابعی از طول تکیه‌گاه و عمق جریان است [1]. همچنین به منظور حذف تاثیر آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی و مخدوش کردن نتایج، میزان پیش‌آمدگی هر دو نوع تکیه‌گاه (۱۵ سانتی متر)، کمتر از یک سوم عرض فلوم در نظر گرفته شده است [28]. در جدول (۱) ویژگی‌های آزمایش‌ها نشان داده شده است. آزمایش‌ها با رعایت شرایط آب زلال انجام شده است. بدین منظور قبل از نصب تکیه‌گاه‌ها، آزمایش تعیین سرعت بحرانی انجام شد و با انجام چندین تکرار مقدار ۰/۳ متر بر ثانیه به عنوان سرعت آستانه حرکت رسوبات به دست آمد. پارامتر های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش شامل دبی و عمق جریان و توپوگرافی بستر بوده که اندازه گیری به ترتیب به وسیله سرریز مثلثی، سطح سنج (Point-Gage) ومتر لیزری انجام شده است.



شکل ۱ جزییات فلوم آزمایشگاهی

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌ها

سرعت/سرعت بحرانی	سرعت جریان (cm/s)	عدد فرود	عمق جریان (cm)	بده (L/s)	شماره آزمایش
۰/٦٥	۱۹/۵	۰/۱۷۹	۱۲	۲۳/٤	۱
۰/۷۵	۲۲/۵	۰/۲۰۸	۱۲	۲۷	۲
۰/۸۵	۲۵/۵	۰/۲۳۵	۱۲	۳۰/٦	۳
۰/۹۰	۲۷	۰/۲۵۰	۱۲	۳۲/٤	٤



شکل ۲ تغییرات زمانی آبشستگی در عدد فرود چهارم برای دو نوع تکیه‌گاه

به منظور تعیین مدت زمان انجام آزمایش‌ها در ابتدا آزمایش‌های ۱۲ ساعته در اعداد فرود مختلف انجام شده است. در این آزمایش‌ها تغییرات درصد عمق نهایی آبشستگی نسبت به زمان رسم گردیده است. به عنوان نمونه در شکل (۲) این تغییرات در بیشترین عدد فرود برای دو تکیه‌گاه نشان داده شده است. سپس مدت زمانی که به ازای آن بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی ۱۲ ساعته رخ داده، به عنوان زمان انجام آزمایش‌ها تعیین گردیده که برابر ۲٤۰ دقیقه بوده است. لازم به ذکر است که در مطالعاتی که هدف آن ها ارائه روابط پیش بینی عمق آبشستگی تعادلی می‌باشد نیاز به انجام آزمایش‌های طولانی مدت است که در ادبیات فنی تا ٩٦ ساعت هم گزارش شده است [29]. اما با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر مقایسه گزینه‌های مختلف و تاثیر آن ها بر عمق آبشستگی است مدت زمان آزمایش‌ها کوتاه تر در نظر گرفته شده است. مرور پژوهش‌های پیشین نیز مطالعات مشابه آبشستگی با زمان های ٤ ساعت و کمتر را نشان می‌دهد [31,30]. با توجه به همین هدف، اعداد فرود متفاوت با نسبت‌های سرعت به سرعت بحرانی متفاوت نیز در نظر گرفته شده اند.

آزمایش‌های شاهد

این گروه از آزمایش‌ها، که مجموعا شامل ۸ آزمایش می باشد (٤ عدد فرود در دو نوع تکیه‌گاه)، با نصب تکیه‌گاه محافظت نشده طبق جدول (۱) انجام گردید. در پایان هر آزمایش، توپوگرافی بستر در شبکه ۳ در۳ سانتی‌متر برداشت گردیده است. هرچند متناسب با ناهمواری بستر در مناطقی، برداشت متراکم‌تر شده است. نتایج آزمایش-های شاهد برحسب پارامترهای بدون بعد عدد فرود (Fr) در مقابل عمق آبشستگی نسبی که عبارت است از نسبت عمق آبشستگی نقطه مبنا به عمق جریان (ds/y) در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد. نتایج آزمایش‌های ارزیابی نیز

بر اساس همین پارامترها و طبق مطالعات مشابه قبلی ارائه گردیده‌اند [۲۷–۲۵].

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های شاهد بر حسب عمق آبشستگی نسبی (ds/y) در دماغه تکیه‌گاه

نوع تکیه‌گاه	Fr_1	Fr_2	Fr_3	Fr_4
با دیواره قائم	۳/۱	٤/٦	٥/٤	٧/٩
با دیواره بالی شکل	۲/۰	۲/۹	٤/٢	٦/٥

آزمایش‌های ارزیابی

به منظور بررسی تاثیر کارگذاری المان‌های شش‌پایه و سنگ‌ریزه بر مهار آبشستگی، آزمایش‌ها ارزیابی در سه مرحله طراحی گردیدند. در گروه اول، دوم و سوم به ترتیب کارگذاری سنگ‌ریزه، المان‌های شش‌پایه و ترکیب آن‌ها مورد توجه قرار گرفت. در ادامه در مورد هر یک از این گروه‌ها بحث و بررسی انجام شده است.

آزمایش‌های ارزیابی مرحله اول

در مرحله اول که شامل ۸ آزمایش می‌باشد (٤ عدد فرود در دو نوع تکیه‌گاه)، سنگ‌ریزه بر روی بستر پیرامون تکیه‌گاه کارگذاری گردید. هدف از طراحی این آزمایش‌ها بررسی تاثیر کارگذاری سنگ‌ریزه بر کاهش عمق آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه می باشد.

جهت تعیین مشخصات سنگ‌ریزه پایدار آزمایش‌های اولیه متعددی در آزمایشگاه صورت گرفت. دو نکته مهم در مورد اندازه سنگ‌ریزه در کنترل آبشستگی اهمیت زیادی دارد: اول اینکه اندازه آنها به حدی برسد که با عبور جریان حرکت نکند و دوم آنکه سرعت جریان عبوری از میان قطعات سنگ‌ریزه در حدی باشد که موجب فرسایش در لایه تحتانی یا خاک زیرین نگردد، یا به بیان دیگر منجر به فرسایش زیرسطحی نشود. بنابراین با توجه به این موضوع، ابتدا آزمایش‌های متعدد جهت تعیین سنگ‌ریزه مناسب صورت گرفت. همچنین تعیین اندازه سنگ‌ریزه مناسب با استفاده از رابطه های -5,32] 34] مورد توجه قرار گرفت و با توجه به مسیر مستقیم کانال از رابطه [5]، اندازه D_{50}=2.3 mm برای سنگ‌ریزه انتخاب گردید و مورد آزمایش قرار گرفت. نهایتا بهترین سنگ با جرم مخصوص ۱/۷ گرم بر سانتی متر مکعب (از نوع سنگ‌های آتش فشانی که بیشتر در صنعت ساختمان کاربرد دارد، شکل (۳– الف)) مورد استفاده قرار گرفت. سنگ‌ریزه مورد استفاده دارای ابعادی یکنواخت و تیز گوشه می‌باشند. المان‌های سنگ‌ریزه طبق پیشنهاد [35] و [٣٦] در لایه‌ای همتراز بستر قرار داده شد. در این حالت سنگ‌ریزه، کمتر تحت تاثیر جریان قرار گرفته و پایداری بیشتری دارد. گستره پوشش پیرامون تکیه‌گاه ۱۳ سانتی متر در نظر گرفته شد (شکل ۳–ب). طبق رابطه [37] و با در نظر گرفتن شرایط آزمایش‌ها، حداقل گستره لازم جهت پوشش پیرامون تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل به منظور اجتناب از گسیختگی ۷ سانتی متر می‌باشد. بنابراین گستره پوشش انتخاب شده (۱۳ سانتی‌متر) مقداری قابل قبول خواهد بود. علت انتخاب ۱۳ سانتی متر جهت گستره پوشش سنگ‌ریزه با توجه به گستره پوشش ایجاد شده هنگام چیدمان المان‌های بتنی شش‌پایه می‌باشد. همچنین، در ارتباط با گستره پوشش لازم المان‌های شش‌پایه پیرامون تکیه‌گاه پل، مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام شد. محققان در اعداد فرود مختلف و شرایط آب زلال، گستره‌هایی شامل دو، سه و چهار ردیف را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها در نهایت گستره پوشش شامل سه ردیف را بهترین حالت کارگذاری گزارش نمودند که منطبق با نحوه کارگذاری المان‌ها در پژوهش حاضر می‌باشد [۳۸]. ضخامت لایه سنگ‌ریزه طبق معیار مرجع [33] دو برابر قطر متوسط المان‌های سنگ‌ریزه انتخاب گردید. پس از تعیین پارامترهای هندسی پوشش سنگ‌ریزه کارگذاری آن پیرامون تکیه‌گاه و انجام آزمایش‌ها مطابق جدول (۱) انجام شد. نتایج این مرحله از آزمایش‌های ارزیابی در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳ بیشینه عمق آبشستگی نسبی (ds/y) دماغه تکیه‌گاه‌ها (نتایج آزمایش‌های ارزیابی مرحله اول)

نوع تکیه‌گاه	Fr_1	Fr_2	Fr_3	Fr_4
با دیواره قائم	۰/۹	۱/٤	٤/۲	٥/٥
با دیواره بالی شکل	۰/۸	۱/۲	۱/۸	۳/۷



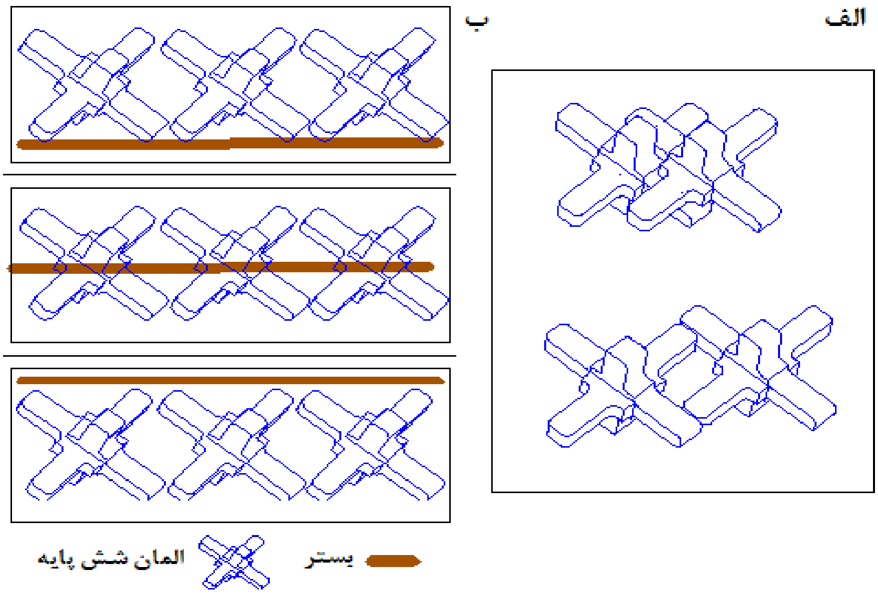
شکل ۳ (الف) سنگ‌ریزه مورد استفاده در آزمایش، (ب)کارگذاری سنگ‌ریزه پیرامون تکیه‌گاه با دیواره قائم

آزمایش‌های ارزیابی مرحله دوم

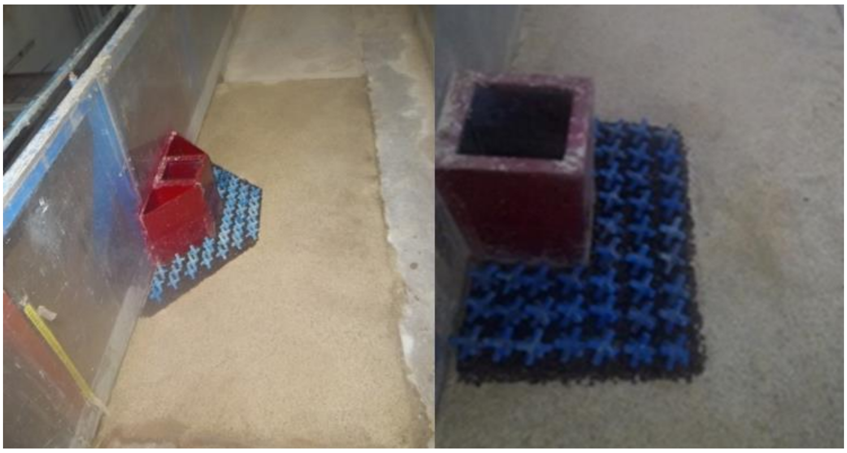
در مرحله دوم آزمایش‌های ارزیابی، که شامل ٤۸ آزمایش می‌باشد (٤ عدد فرود، ۲ نوع تکیه‌گاه، و ۳ عمق کارگذاری و ۲ تراکم مختلف)، کارگذاری المان‌های شش‌پایه بتنی پیرامون تکیه‌گاه انجام شد. هدف از طراحی این گروه از آزمایش‌ها، بررسی تاثیر کارگذاری المان‌های بتنی شش‌پایه پیرامون تکیه‌گاه در تراکم و اعماق متفاوت کارگذاری و مقایسه نتایج با محافظت به وسیله سنگ‌ریزه به عنوان یک روش مرسوم می‌باشد. درشکل (٤) کارگذاری المان‌ها در تراکم و اعماق مختلف نشان داده شده است.

با قرارگیری متراکم‌تر المان‌ها در کنار یکدیگر، پایداری آن‌ها افزایش یافته و درصد بیشتری از بستر تحت پوشش قرار می‌گیرد. در این حالت تعداد قطعات مورد نیاز در واحد سطح بیشتر خواهد بود.

به منظور واکاوی اثر تراز کارگذاری المان‌ها در مهار آبشستگی، سه تراز روی بستر(D1)، زیر بستر(D2) و بین این دو عمق (D3) مطابق شکل (٤) مورد توجه قرار گرفت. در تراز D1، زبری المان نقش بیشتری داشته و میتواند ضمن ایجاد پوشش باعث راندن جریان از رأس تکیه‌گاه نیز شود. از طرفی در این تراز قرارگیری، پایداری المان‌ها می‌تواند به خطر افتد. در تراز کارگذاری D2 المان‌ها نقش کمتری در ایجاد زبری داشته و از پایداری بیشتری برخوردار خواهد بود.



شکل ٤ آرایش کارگذاری المان‌های شش پایه: (الف) تراکم‌های کم (باز) و زیاد (متراکم)، (ب) اعماق کارگذاری نسبت به بستر



شکل ۵ کارگذاری همزمان سنگ‌ریزه و المان‌های شش‌پایه اطراف تکیه‌گاه بر روی بستر

آزمایش‌های ارزیابی مرحله سوم

با توجه به نتایجی که از آزمایش‌های مرحله اول و دوم به دست آمد، آزمایش‌های مرحله سوم مشتمل بر ۲٤ آزمایش (٤ عدد فرود، ۲ نوع تکیه‌گاه، ۳ عمق کارگذاری و ۱ تراکم باز)، طراحی و اجرا گردیدند. در این مرحله ترکیب کارگذاری المان‌های سنگ‌ریزه و المان‌های بتنی شش‌پایه جهت محافظت تکیه‌گاه مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور المان‌های شش‌پایه بتنی در اعماق مختلف و تراکم باز پیرامون تکیه‌گاه کارگذاری گردیدند. در شکل (۵) نمایی از این نوع آرایش لایه های حفاظتی پیرامون هر دو نوع تکیه‌گاه در حالتی که المان‌های شش‌پایه و سنگ‌ریزه بر روی بستر هستند نشان داده شده است.

یافته‌ها و بحث

در آزمایش‌های شاهد بیشینه آبشستگی، در گوشه بالادست یا دماغه تکیه‌گاه رخ داده است. بنابراین این نقطه به عنوان مبنای مقایسه بیشینه آبشستگی مورد توجه قرار گرفته است. در تکیه‌گاه با دیواره قائم، گردابه‌های شدیدتری شکل گرفته و در نتیجه اعماق آبشستگی در رأس این تکیه‌گاه به طور میانگین حدود ۲۸ درصد بیشتر از مقادیر متناظر در تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل می‌باشد. بیشینه آبشستگی در انتهای آزمایش‌های شاهد برای هر دو تکیه‌گاه در جدول (٤) نشان داده شده است.

جدول ٤ بیشینه عمق آبشستگی نسبی (ds/y) دماغه تکیه‌گاه‌ها در آزمایش‌های شاهد

نوع تکیه‌گاه	Fr_1	Fr_2	Fr_3	Fr_4
با دیواره قائم	۳/۱	٤/٦	٥/٤	۷/۹
با دیواره بالی شکل	۲/۰	۲/۹	٤/۲	٦/٥

در آزمایش‌های ارزیابی مرحله اول، محافظت تکیه‌گاه ها با کارگذاری سنگ‌ریزه انجام شد. نتایج نشان داد که کارگذاری سنگ‌ریزه می‌تواند آبشستگی نقطه مبنا را تا ۷۰/۳ و ٦۰ درصد به ترتیب در تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل تخفیف دهد (جدول ۵).

جدول ۵ درصد کاهش عمق آبشستگی دماغه تکیه‌گاه ها با کارگذاری سنگ‌ریزه

نوع تکیه‌گاه	Fr_1	Fr_2	Fr_3	Fr_4
با دیواره قائم	۷۰/۳	٦۹/۱	۲۳/۱	۳۰/٥
با دیواره بالی شکل	٥۸/۳	٦۰	٥٦	٤۳/٦

در آزمایش‌های ارزیابی مرحله سوم، المان‌های شش‌پایه در تراز و تراکم های ذکر شده کارگذاری شدند. نتایج نشان داد که، بهترین نتایج مهار آبشستگی در هر تراکم زمانی به دست می آید که المان‌ها بر روی بستر

قرار گرفته بودند. علت را می توان به زبری المان‌ها مرتبط دانست. در این تراز قرار گیری، اثر زبری بیش از دیگر ترازها بوده و منجر به مهار جریان رو به پایین در وجه بالادست تکیه‌گاه شده است. همچنین بیشترین مقادیر آبشستگی در تراز D2 یا زیر بستر رخ داد. در این تراز، المان‌ها در زیر بستر قرارگرفته و زبری آن‌ها نقشی در کنترل آبشستگی نداشته است. هرچند با گذشت زمان و پیشرفت آبشستگی، المان‌ها به تدریج آشکار شده و اثر زبری آن ها نسبت به آغاز آزمایش بیشتر می‌گردد. در تراز قرارگیری D3 مقادیر آبشستگی مابین مقادیر متناظر دو تراز قرارگیری دیگر قرار گرفت. در ارتباط با رقوم قرارگیری پوشش، پژوهش‌های کم تعدادی، توسط دیگر دانشمندان مثل [35] و [۳۹,40] صورت گرفته است. آن-ها در ارتباط با محافظت پایه توسط سنگ‌ریزه، در شرایط بستر زنده آزمایش‌هایی ترتیب دادند و نتیجه گیری کردند که در شرایط بستر زنده که فرم بستر ایجاد می-گردد، تراز قرارگیری سنگ‌ریزه در کمینه تراز فرم‌های بستر باشد.

در مورد اثر تراکم قرارگیری المان‌ها بر مهار آبشستگی، بهترین نتایج در هر تراز قرارگیری، زمانی حاصل شد که المان‌ها به صورت متراکم در کنار یکدیگر قرار گرفتند. علت را می توان به ایجاد پوشش بیشتر در چیدمان متراکم مرتبط دانست. در تراکم باز یا کم، در حدود ٥٤٪ مساحت بستر و در کارگذاری متراکم ۹۷٪ سطح بستر پوشانده می‌شود. از طرفی در چیدمان متراکم، تعداد المان‌ها در واحد سطح بیشتر می‌گردد. در مطالعه حاضر تعداد المان‌های به کار رفته در تراکم کم و زیاد پیرامون تکیه‌گاه با دیواره قائم به ترتیب ۵۱ و ۸۲ قطعه و پیرامون تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل به ترتیب ٦۳ و ۹۸ قطعه بوده است.

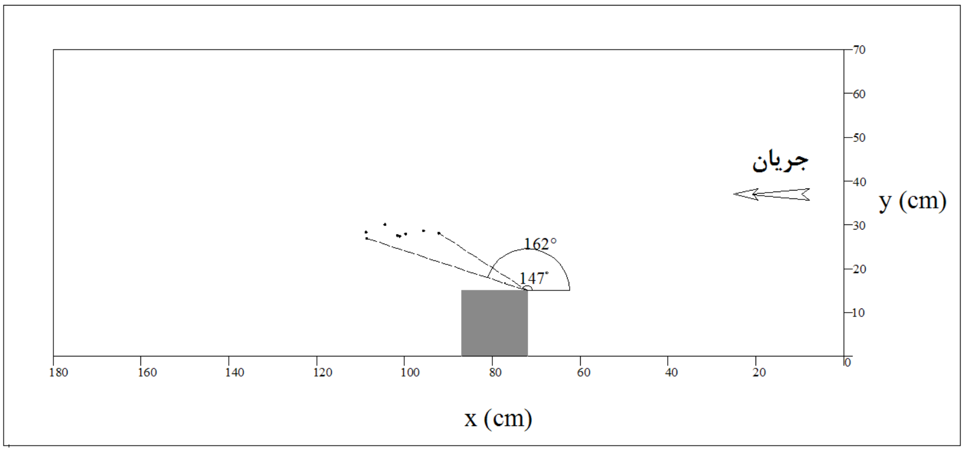
پژوهش‌های [14,15] محدود به مطالعه کارایی المان‌ها در حفاظت پایه پل در چیدمان متراکم و تراز روی بستر بوده است. در حالی که در مطالعه پیش رو، دو تراکم و سه تراز مختلف قرارگیری مورد واکاوی قرار گرفته که نتایج آن به منظور ارائه گزینه‌های مختلف طراحی عمق پی تکیه‌گاه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در گروه دوم آزمایش‌های ارزیابی بهترین نتایج در مهار آبشستگی زمانی رخ داد که المان‌ها بر روی بستر در چیدمان متراکم قرار گرفته‌اند. در جدول (٦) درصد کاهش آبشستگی در نقطه مبنا در این گروه از آزمایش‌ها دیده می‌شود. جهت اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان به مطالعات [۱۷و۱٦] مراجعه کرد.

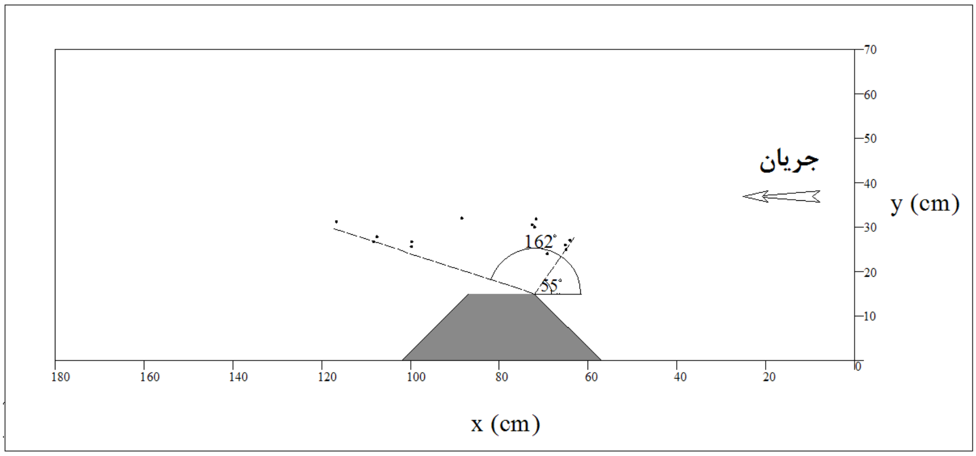
جدول ٦ درصد کاهش عمق آبشستگی نقطه مبنا (٪) در آزمایش‌های گروه دوم

عدد فرود	D_3 عمق میانه		D_2 زیر بستر		D_1 روی بستر		تراز کارگذاری
	تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل	تکیه‌گاه با دیواره قائم	تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل	تکیه‌گاه با دیواره قائم	تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل	تکیه‌گاه با دیواره قائم	تراکم المان‌ها
۰/۱۷۹	٤	۳۰	۰	۸	۷۱	۷٦	T_1
۰/۲۰۸	۱۷	٤٦	۱۱	۱۸	٦٦	٦٤	تراکم کم
۰/۲۳۵	۲۸	٤۳	۲٦	۳۲	۷۲	۷۷	
۰/۲۵۰	۵۱	۵۹	٤۹	٤۸	۷۷	۸۰	
۰/۱۷۹	۲۲	۸۱	۷۱	٤۳	۱۰۰	۷٤	T_3
۰/۲۰۸	۸۰	۷۳	۵۱	۵۱	۱۰۰	۸۰	تراکم زیاد
۰/۲۳۵	۸٤	٦۹	۵۲	٤۸	۸۸	۸۲	
۰/۲۵۰	۸۲	۷٦	٦۵	۵۱	۹۱	۸٦	

قرارگیری المان‌ها بر روی بستر در چیدمان متراکم آبشستگی دماغه تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل را به ترتیب تا ٨٦ و ١٠٠ درصد کاهش داد. در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر که تاثیر کارگذاری تعداد ردیف این المان‌ها را بر پایه پل با مقطع مربعی بررسی می‌نمود، تاثیر تعداد ردیف کارگذاری المان‌ها برآبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. محققان گزارش نمودند که با افزایش تعداد ردیف کارگذاری، آبشستگی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در سه ردیف کارگذاری آبشستگی به‌طور کامل حذف گردید [٣٨]. از سویی مشاهدات نشان داد که در مطالعه‌ی حاضر، این چیدمان المان‌ها ضمن ایفای نقش پوششی، منجر به انحراف جریان به سمت پایین دست و مرکز، و در نتیجه انتقال نقطه با عمق بیشینه آبشستگی به آن مناطق نیز می‌گردند. علت را می‌توان در ارتفاع المان‌ها نسبت به بستر جستجو کرد: ارتفاع المان‌ها نسبت به بستر ٣/۵ سانتی متر بوده است. این میزان در حدود یک سوم عمق جریان بوده است. شکل (٦) و (٧) نشان دهنده محدوده نقاط جابجا شده با عمق آبشستگی بیشینه در دو نوع تکیه‌گاه می‌باشد. جابجایی نقطه بیشینه عمق آبشستگی از یک سو محافظت بیشتر از پی را به همراه داشته و از سویی می‌تواند منجر به ایجاد گسیختگی برای پوشش حفاظتی پیرامون تکیه‌گاه گردد.



شکل ٦ محدوده نقاط جابجا شده با عمق آبشستگی بیشینه در تکیه‌گاه با دیواره قائم



شکل ٧ محدوده نقاط جابجا شده با عمق آبشستگی بیشینه در تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل

انواع مکانیزم‌های گسیختگی پوشش که در بستر افقی و در شرایط آب زلال پیرامون تکیه‌گاه قرار گرفته است شامل شکست برشی، تخریب زیرسطحی و شکست لبه‌ای می‌باشد. این مکانیزم‌ها می‌تواند به صورت منفرد و یا به اتفاق یکدیگر منجر به گسیختگی پوشش محافظتی گردند. در مطالعه حاضر با توجه به ابعاد المان‌های شش‌پایه و شرایط هیدرولیکی آب زلال گسیختگی برشی رخ نداده است. شکست زیرسطحی زمانی رخ می‌دهد که رسوبات بستر از لابه‌لای قطعات پوشش فرسایش یابند. در این حالت پوشش عملا قادر به مهار آبشستگی نبوده و دچار نشست می‌گردد. اجرای فیلتر یا اجرای چند ردیفه پوشش به نحوی که به صورت فیلتر عمل کند، راه حل اجتناب از این نوع گسیختگی است. در مطالعه حاضر با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان این نوع گسیختگی مشاهده نگردیده است.

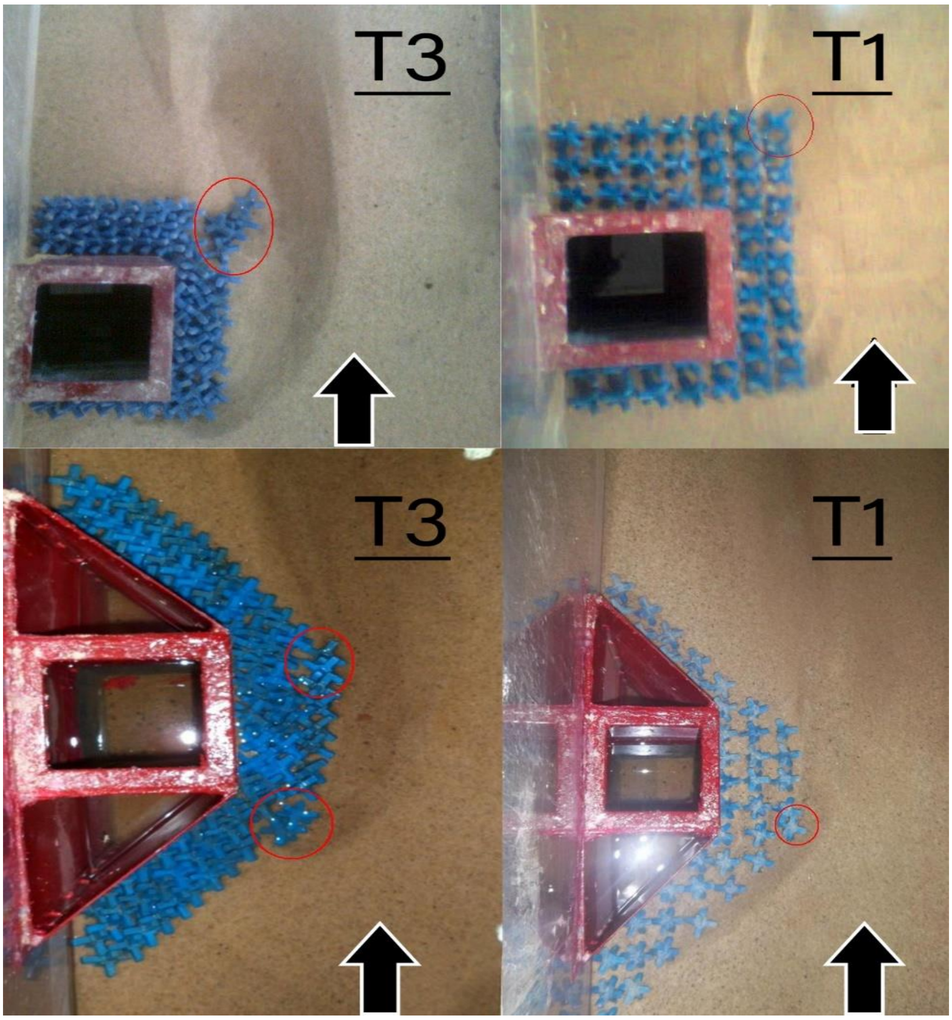
شکست لبه‌ای که در حاشیه پوشش به واسطه فرسایش موضعی رسوبات ایجاد می‌گردد منجر به گردش یا لغزش قطعات پیرامون پوشش به سمت بیرون شده و گسیختگی آن را موجب می‌گردد. در آزمایش‌های این گروه، این نوع گسیختگی مشاهده شده است. شکست لبه‌ای تحت شرایط هیدرولیکی عدد فرود بیشینه و در تراز کارگذاری روی بستر (D_1) ، یعنی همان عمقی که بهترین حفاظت از تکیه‌گاه را به عمل می‌آورد، در هر دونوع تکیه‌گاه رخ داده است. به بیان دیگر کارگذاری المان‌ها در زیر بستر یا در حالتی که نیمی از آن‌ها در زیر بستر قرار گرفته باعث اجتناب از شکست لبه‌ای می‌گردد، هرچند تاثیر کمتری در مهار آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه دارد.

این نتایج قابل مقایسه با یافته‌های [40] می‌باشد، آن‌ها نیز در مطالعه خود نتیجه گرفتند که هرچه عمق کارگذاری سنگ‌ریزه در تراز پایین‌تری باشد پایداری آن بیشتر خواهد بود. همچنین [۳۹] در مطالعه‌ای به مقایسه پایداری سه رقوم مختلف کارگذاری سنگ‌ریزه (روی بستر، هم تراز بستر و زیر بستر) پیرامون تکیه‌گاه پل در قوس ۹۰ درجه پرداختند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که کارگذاری سنگ‌ریزه بالاتر از بستر که معادل عمق کارگذاری D_1 در مطالعه پیش رو می‌باشد، کم‌ترین میزان پایداری را دارد که مشابه نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. همانطور که اشاره شد گسیختگی پوشش المان‌های شش-پایه (از نوع لبه‌ای) فقط در عمق کارگذاری روی بستر مشاهده گردیده است. شکل (۸) نشان دهنده آزمایش‌های دچار گسیختگی از نوع لبه‌ای می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد شدت و ابعاد گسیختگی لبه ای در تراکم باز کمتر از تراکم زیاد است. دلیل این موضوع را می‌توان به شدت انحراف بیشتر جریان به سمت مرکز کانال در تراکم‌های بیشتر مرتبط دانست. همان‌طور که در بندهای قبلی اشاره شده به ویژه در تراکم حداکثر جریان از تکیه‌گاه به سمت مرکز منحرف شده و نقطه دارای عمق آبشستگی حداکثر به مرکز انتقال می‌یابد. ایجاد آبشستگی عمیق تر در مرکز کانال استعداد گسیختگی لبه‌ای را نیز افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج این مرحله، آزمایش‌های گروه سوم طراحی و اجرا گردیدند. هدف از اجرای این گروه از آزمایش‌ها، برطرف ساختن نقاط ضعف آزمایش‌های گروه دوم بود. در گروه دوم آزمایش‌ها، از یک سو در تراکم بیشتر میزان مهار آبشستگی کمتر بوده و از سوی دیگر، در این تراکم شکست لبه‌ای پوشش رخ داده است. بنابراین در گروه سوم، تراکم زیاد المان‌ها که منجر به شکست لبه‌ای می‌گردید حذف شده و کارگذاری آن‌ها در تراکم کمتر و با حضور سنگ‌ریزه مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت تعداد قطعات المان در واحد سطح نیز کاهش می‌یابد. در ارتباط با عمق کارگذاری المان‌ها نیز همانطور که اشاره گردید، اعماق بیشتر، از یک سو منجر به پایداری بیشتر المان‌ها و از سوی دیگر منجر به کاهش توانایی آن‌ها در محافظت از تکیه‌گاه می‌گردد. بنابراین اعماق مختلف کارگذاری در این گروه از آزمایش‌ها مورد توجه و مقایسه قرار گرفت. خلاصه نتایج

این گروه از آزمایش‌ها در جدول (۷) قابل مشاهده می باشد. همان‌طور که دیده می‌شود درصد کاهش آبشستگی نقطه مبنا با ترکیب سنگ‌ریزه و المان‌های شش‌پایه بیشتر از سایر چیدمان‌ها می‌باشد، به طوری‌که میانگین درصد کاهش عمق آبشستگی نقطه مبنا در آزمایش‌های گروه اول تا سوم برای تکیه‌گاه با دیواره قائم به ترتیب ۴۸، ۵۹ و ۸۸ درصد و در تکیه‌گاه با دیواره بالی شکل به ترتیب ۵۵، ۶۰ و ۸۸ درصد می‌باشد. به بیان دیگر بهترین مهار آبشستگی در حالت ترکیب سنگ‌ریزه و المان شش‌پایه رخ داده است. این در حالی است که در این گروه از آزمایش‌ها، شکست لبه‌ای لایه حفاظتی نیز مشاهده نگردیده است. همچنین با کارگذاری المان‌های شش‌پایه در تراکم کمتر نتایج بهتری در مقایسه با کارگذاری المان‌های متراکم در گروه دوم آزمایش‌ها به دست آمده است (۱۹ و ۷ درصد به ترتیب در تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل)، ضمن اینکه تعداد المان‌ها نیز ۳۵ درصد کاهش یافته است.



شکل ۸ شکست لبه‌ای در آزمایش‌های با عدد فرود بیشینه و المان‌های روی بستر

جدول ۷ درصد کاهش عمق آبشستگی راس تکیه‌گاه (٪) در آزمایش‌های گروه سوم

نوع تکیه‌گاه	تراز کارگذاری المان	عدد فرود			
		Fr_1	Fr_2	Fr_3	Fr_4
با دیواره قائم	D_1	۹۵	۹۱	۸۹	۸۷
	D_2	۸٤	۸۵	۸٦	۸۵
	D_3	۹۷	۹۵	۸۰	۸۰
با دیواره بالی شکل	D_1	۹٦	۸۹	۸۸	۸۷
	D_2	۷۹	۸۰	۸٤	۸٦
	D_3	۱۰۰	۹٤	۸۲	۷۹

نتیجه گیری

در این پژوهش، مطالعه عملکرد المان‌های شش‌پایه بتنی به عنوان یک روش نوین در مهندسی رودخانه با هدف مهار آبشستگی دو نوع تکیه‌گاه مورد بررسی و مقایسه با کارگذاری سنگ‌ریزه به عنوان یک روش مرسوم با انجام جمعا ۸۸ آزمایش مورد تحقیق قرار گرفت. همچنین ترکیب این دو روش با هدف رفع نقاط ضعف آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردید:

به دلیل تشکیل گردابه های قوی تر در تکیه‌گاه با دیواره قائم، آبشستگی پیرامون آن بیش از تکیه‌گاه با دیواره بالی‌شکل می‌باشد. به طوری که اعماق آبشستگی نقطه مبنا در اعداد فرود مختلف به طور میانگین ۲۸ درصد تفاوت دارد.

کارگذاری سنگ‌ریزه پیرامون تکیه‌گاه با دیواره قائم و بالی شکل، عمق آبشستگی نقطه مبنا را به ترتیب حداکثر تا ۷۰ و ٦۰ درصد کاهش می‌دهد.

کارگذاری المان‌های شش‌پایه بتنی پیرامون تکیه-گاه‌ها با تراکم و ترازهای مختلف، آبشستگی نقطه مبنا را در دیواره قائم و بالی شکل به ترتیب حداکثر تا ۸٦ و ۱۰۰ درصد کاهش می‌دهد.

بهترین نتایج زمانی حاصل می‌گردد که این المان‌ها با تراکم بیشینه و بر روی بستر قرار گرفته باشند.

در حالت فوق شکست لبه‌ای المان‌ها رخ داده که می‌تواند منجر به گسیختگی پوشش گردد.

در مجموع بیشترین مهار آبشستگی زمانی رخ می-دهد که ترکیب سنگ‌ریزه و المان‌های شش‌پایه مورد استفاده قرار گیرند، به‌طوری‌که عمق بیشینه آبشستگی در دیواره بالی شکل و قائم به ترتیب تا 100 و 97 درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که المان‌ها با تراکم باز قرار گرفته و بنابراین تعداد آن‌ها در واحد سطح کاهش یافته است.

در حالت فوق شکست لبه‌ای پوشش نیز مهار شده و پایداری پوشش حفاظتی تامین می‌گردد.

مراجع

1. Melville, B. W., "Local scour at bridge abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118(4), pp.615-631, (1992).
2. Radice, A., Lauva, O., "On flow-altering countermeasures for scour at vertical-wall abutment", *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 59(3-4), pp.137-153, (2012).
3. Radice, A., Davari, V., "Roughening elements as abutment scour countermeasures", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140(8), pp.1-7 (2014).
4. Bejestan, M. S., Khademi, K., Kozeymehnezhad, H., "Submerged vane-attached to the abutment as scour countermeasure", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6(3), pp. 775-783, (2015).
5. Pagan-Ortiz, J. E., "Stability of rock riprap for protection at the toe of abutments located at the

floodplain", United States. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-91-057 (1991).

6. Singh, N. B, Devi, T. T., Kumar, B., "The local scour around bridge piers—a review of remedial techniques", *ISH Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1080/09715010.2020.1752830,* pp. 1-14, (2020).
7. Thornton, C. I., Abt, S. R., Watson, C. C., "Field Assessment of A-Jacks Installation, A Case Study of: Brush, Creek, Kansas City, Missouri Powell Creek, Waukegan, Illinois", Wetlands Engineering & River Restoration 2001, (2001).
8. Corvallis, O. R., "Submerged breakwater tests a-jacks armor units", Master of Science Thesis, Oregon State University, USA, (1996).
9. Lebaron, J. W., "Stability of A-Jacks armored rubble mound breakwaters subjected to breaking and non-breaking waves with no overtopping", Master of Science Thesis, Oregon State University, USA, (1999).
10. Wise, L., "Numerical and physical modeling of wave forces on A-Jacks units", Master of Science Thesis, Oregon State University, USA, (1999).
11. Ripkey, B. J., "Determination of wave run-up, rundown, and reflection design coefficients for a-jacks concrete armor units", Master of Science Thesis, Oregon State University, USA, (1999).
12. Mickel J. J., "A-Jacks Matrix Stability: Deflection Due to Static Normal Loads", Master of Science Thesis, Oregon State University, USA, (1999).
13. Latta, T. E., "Static and dynamic stresses in A-Jacks® concrete armor units", Doctoral dissertation, Auburn University, USA, (2000).
14. Thornton, C. I., Watson, C. C., Abt, S. R., Lipscomband C. M., Ullman, C. M. a., "Laboratory Testing of A-JACKS Units for Inland Applications: Pier Scour Protection Testing", Colorado State University research report prepared for Armortec Inc., (1999).
15. Thornton, C. I., Watson, C. C., Abt, S. R., Lipscomband C. M., Ullman, C. M. b., "Laboratory Testing of A-JACKS Units for Inland Applications: Full Scale Testing", Colorado State University research report for Armortec Inc., February. (1999).

۱٦. ذوالقدر، م.، شفاعی بجستان، م.، "تاثیر آرایش کارگذاری المان های شش پایه بر پستی و بلندی بستر اطراف تکیه گاه ذوزنقه‌ای"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب ١١(٣٦) ، ص ٥٨-٤٧ ، (١٣٩٧).

۱۷. ذوالقدر، م.، شفاعی بجستان، م.، "تأثیرتراکم و رقوم کارگذاری قطعات شش‌پایه برعمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی"، دانش آب و خاک ,(٤)٢٦، ص١٣٥-١١٩، (١٣٩٧).

18. Zolghadr, M., Shafai Bejestan, M., "Six legged concrete (SLC) elements as scour countermeasures at wing wall bridge abutments", *International Journal of River Basin Management. DOI: 10.1080/15715124.2020.1726357*, pp. 1-7, (2020).

۱۹. حسین رضا، ع.، شفاعی بجستان، م.، قمشی، م.، فتحی مقدم، م.، "کاربرد همزمان سنگچین و المان های شش پایه در کنترل عمق آبشستگی اطراف تکیه گاه پل مستطیل شکل"، علوم و مهندسی آبیاری، دوره. ۴۲(۱) ، ص ۱۱۴-۹۹ (۱۳۹۸).

20. Khademghaeiny, Gh., Abrishami, J., Zarrati, A. R., Karimaei Tabarestani, M., and Mashahirb, M., "Riprap design at bridge piers with limited scouring", *Journal of Scientia Iranica A*. Vol. 27(2), pp. 588-595, (2020).

21. Abboud, B., and Coe, J., "Environmental and Cost Effectiveness of Partially Grouted Riprap for Scour Countermeasure. Pennsylvania Department of Transportation", *Report No. FHWA-PA-2019-004-TEM WO 001*, pp. 215, (2019).

۲۲. کریمایی طبرستانی، م.، "مطالعه پایداری و تحلیل حساسیت لایه سنگچین محافظ در اطراف پایه‌های پل بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان"، نشریه هیدرولیک، (۱۴)۴، ص ۶۸-۵۱، (۱۳۹۸).

۲۳. شفاعی بجستان، م.،" مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب" انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۷).

۲۴. شفاعی بجستان، م.، "مبانی و کاربرد مدل های فیزیکی و هیدرولیکی" انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۸۴).

۲۵. خادمی، خ.، "بررسی اثر فواصل طولی و عرضی صفحات مستغرق بر آبشستگی موضعی ایجاد شده در محل تکیه گاه پل"، پایان نامه دکتری گرایش سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، (۱۳۹۱).

۲۶. خزیمه نژاد، ح.، "بررسی ابعاد و موقعیت قرارگیری طوقه بر آبشستگی موضعی ایجاد شده در محل تکیه گاه پل"، پایان نامه دکتری گرایش سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران، (۱۳۹۱).

۲۷. رمضانی، ی.، "بررسی تاثیر پوشش گیاهی دشت سیلابی بر آبشستگی تکیه گاه پل در مقطع مرکب"، پایان نامه دکتری گرایش سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، (۱۳۹۱).

28. Ballio, F., Teruzzi, A., and Radice A.,"Constriction effects in clear-water scour at abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135(2), pp. 140–145, (2009).

29. Kothyari, U. C., Garde, R. C. J., and Ranga Ranju, K. G., "Temporal variation of local scour around circular bridge pier", *Journal of Hydraulic Engineering.*, Vol. 118(8), pp. 1091-1106, (1992).

30. Bozkus, Z., Osman, Y., "Effect of inclination of bridge piers on scouring depth", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130(8), pp. 1260-1269, (2004).

31. Pagliara, S., Hassanbandi, L. S., and Kurdistani, S. M., "Log-Vane Scour in clear water Condition", *Journal of River Research and Applications*, Vol. 31(9), pp. 1176–1182, (2015).

32. Lagasse, P. F., Richardson, E. V., "ASCE compendium of stream stability and bridge scour papers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127(7), pp. 531-533, (2001).

33. Melville, B. W., Van Ballegooy, S., Coleman, S. E., and Barkdoll, B., "Riprap size selection at wing-wall abutments", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 133(11), pp. 1265-1269, (2007).

34. Simons, D. B., Lewis, G. L., "Report–Flood Protection at Bridge Crossings", prepared for the Wyoming State Highway Department in conjunction with the U.S. Department of Transportation, C.S.U. Civil Engineering Report No. CER71-72DBS-GL10, (1971).

35. Lauchlan, C. S., "Pier Scour Countermeasures", *Ph. D. Thesis, University of Auckland, Auckland, NZ,* (1999).

۳٦. منصوری هفشجانی، م.، و شفاعی بجستان، م.، "طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، (٤)١، صص۳۵-۳٤، (۱۳۹۰).

37. Cardoso, A. H., Fael, C. M., "Protecting vertical-wall abutments with riprap mattresses", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135(6), pp.457-465, (2009).

۳۸. زیلایی، ز.، شفاعی بجستان، م.، "تأثیر تعداد ردیف عناصر شش پایه درکاهش عمق آب شستگی پیرامون پایه پل مکعبی"، دانش آب و خاک، (۲,٤)، ۲٦، ص۲۰۰-۱۸۷، (۱۳۹۵).

۳۹. منصوری هفشجانی، م.، شفاعی بجستان، م.، "مقایسه تاثیر سه رقوم قرارگیری سنگ چین بر پایداری آن در محل تکیه گاه پل واقع در قوس ۹۰درجه براساس آستانه حرکات سنگ چین"، دانش آب و خاک (۲۳)۲، ص۲۰٤-۱۹۵، (۱۳۹۲).

40. Bakhtiari, M., Kashefipour, S, M., and Ghomeshi, M., "Criteria for Design of Rip Rap using bend form coastal protection plan", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 13(2), pp. 81-91, (2014).